

課題名 (タイトル) :

Direct numerical simulation of superconducting detectors

利用者氏名 : 太田 幸宏

所属 : 和光研究所 基幹研究所 物質機能創成研究領域 単量子操作研究グループ
デジタル・マテリアル研究チーム

1. 本課題の研究の背景、目的、関係するプロジェクトとの関係

超伝導検出器は単一光子、中性子、分子などの精密検出に利用されている。その動作には、非平衡超伝導現象、熱伝導、渦糸ダイナミクスなど様々な現象が関わる。そのため、その精密な理論解析はほとんど行われていない。本課題の目的は、大規模計算機を利用することで、3次元空間における超伝導検出器のダイナミクスを調べることであり、そして、デバイスの性能向上に資するシミュレーション手法の構築につなげる。

2. 具体的な利用内容、計算方法

超伝導検出器の非平衡現象を調べるため、時間依存 Ginzburg-Landau 方程式、Maxwell 方程式、そして熱伝導方程式を結合させた数値シミュレーションを実施する。物理量は空間方向について有限差分法で離散化され、その時間更新はオイラー法で行われる。空間メッシュサイズは長さ: 200、幅: 40、厚み: 6 であり、これは単一光子検出器での超伝導薄膜に対応する (長さ方向は、実際のデバイスに比べて短いものを採用している)。電磁場については、格子ゲージ理論におけるリンク変数を使い、安定な計算を達成する。計算コードは MPI により並列化されている。また、現実のサンプルにおける空間的不均一性を反映させるべく、熱伝導率や熱浴結合定数を空間の関数として変化できるように改良を加えた。

3. 結果

NICT (情報通信研究機構) における超伝導単一光子検出器の実験パラメータを用い、光子入射による超伝導薄膜の電磁応答を調べた。まず、入射エネルギーに依存して、様々な超伝導応答を確認された。具体的には、低エネルギー側では、線状の弱い超伝導領域が空間的に広がり、その結果 J_c の低い領域が現れ電圧状態への転移が確認された。これは従来より理論的に提案

されていた電圧発現メカニズムに対応すると考えられる。一方、高エネルギー側では、電圧状態転移に渦糸-反渦糸の形成と対消滅が関与することも見出した。この高エネルギー側の挙動は単一光子より分子検出に関わっていると考えられる。次に、電圧状態へのエネルギー閾値を精査した。これまでのシミュレーションでは、エネルギー閾値について、実験値との乖離が顕著だった。この問題を解決すべく、熱浴との結合や準粒子ゆらぎの強度を変更し、エネルギー閾値を調べた。そして、実験値と consistent なパラメータ領域を見出した。一連の成果は超伝導工学における世界的な国際会議 (ASC2012) において invited oral talk として選出された。

4. まとめ

現実的な実験パラメータとデバイス構造にもとづき、超伝導検出器のダイナミクスのシミュレーションに成功した。定量性 (特に、入射光子エネルギー) について実験との乖離を解決する手法についても研究をし、一定の成果を得た。

5. 今後の計画・展望

実験で報告されている様々なデバイス特性のメカニズムを明らかにすべく、シミュレーションを実施したい。得に、検出効率と動作温度については、低温ほど検出効率が上昇するという報告があり、この現象の説明を試みる。

平成 24 年度 RICC 利用研究成果リスト

【論文、学会報告・雑誌などの論文発表】

【国際会議などの予稿集、proceeding】

Y. Ota, M. Machida, T. Koyama, and F. Nori, “Full Numerical Simulations of Dynamical Response in Superconducting Single-Photon Detectors,” Accepted for publication in IEEE Transactions on Applied Superconductivity

【国際会議、学会などでの口頭発表】

Y. Ota, M. Machida, T. Koyama, and F. Nori, “Full Numerical Simulations of Dynamical Response in Superconducting Single-Photon Detectors,” Applied Superconductivity Conference 2012 (ASC2012), Oregon Convention Center, Portland, Oregon, US, Oct. 17-12 (2012)